

风化矽石山不同侵蚀微生境的 基质理化性质与水分特征

王东丽¹, 刘艺¹, 张子倩¹, 赵晓亮¹, 王东², 杨光³

(1.辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2.辽宁工程技术大学
矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 3.辽宁省阜新市产业技术创新推广中心, 辽宁 阜新 123000)

摘要: [目的] 研究不同侵蚀微生境下基质的理化性质与水分特征, 为揭示其植被定居与恢复的驱动与限制机制提供理论基础, 为北方早期矿区废弃地植被重建的实践提供科学参考。[方法] 以裸坡、细沟、浅沟与堆积体为研究对象, 研究其基质的机械组成、容重、毛管孔隙度、pH值、电导率与水分特征及其相互关系。[结果] 各粒径基质在不同侵蚀微生境间变化各异, 而且不同土层间存在差异。不同侵蚀微生境基质容重大小表现为: 浅沟>细沟>裸坡>堆积体, 而毛管孔隙度大小表现为: 堆积体>裸坡>浅沟>细沟。不同侵蚀微生境基质的pH值无显著性差异, 但在不同土层变化有所差异; 电导率均表现为: 堆积体>裸坡>浅沟>细沟, 且在10—20 cm土层高于0—10 cm土层。不同侵蚀微生境的基质含水率与毛管持水量均表现为: 堆积体>裸坡>浅沟>细沟, 裸坡与浅沟的基质含水率与毛管持水量均在上坡位最低, 而细沟的在中坡位最低。[结论] 风化矽石山基质水分特征主要受容重和毛管孔隙度影响显著, 裸坡和堆积体砂粒和中粗粒相对较多, 水分较好, 可为植被定居与恢复提供安全生境。

关键词: 风化矽石山; 侵蚀微生境; 机械组成; 理化性质; 水分特性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0024-07

中图分类号: S152.3

文献参数: 王东丽, 刘艺, 张子倩, 等. 风化矽石山不同侵蚀微生境的基质理化性质与水分特征[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 24-30, 52. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.004; Wang Dongli, Liu Yi, Zhang Ziqian, et al. Physical-chemical characteristics and moisture characteristics of substrates in different eroded microhabitats of weathered gangue dumps [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 24-30, 52.

Physical-chemical Characteristics and Moisture Characteristics of Substrates in Different Eroded Microhabitats of Weathered Gangue Dumps

Wang Dongli¹, Liu Yi¹, Zhang Ziqian¹, Zhao Xiaoliang¹, Wang Dong², Yang Guang³

(1.College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin,

Liaoning 123000, China; 2.College of Mines, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

3.Industrial Technology Innovation and Promotion Center of Fuxin City in Liaoning Province, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: [Objective] The physical and chemical properties and water characteristics of substrates under different eroded microhabitats were studied to provide a theoretical basis for understanding the driving and limiting mechanisms of vegetation settlement and restoration, and to provide scientific references for the practice of vegetation reconstruction in early abandoned mining areas in the North China. [Methods] The mechanical composition, bulk density, capillary porosity, pH value, electrical conductivity, and moisture characteristics of bare slopes, rills, shallow gullies, and deposit bodies were studied, and the relationships between them were analyzed. [Results] Particle size matrices varied among different eroded microhabitats, and there were differences among different soil layers. The bulk density of the substrates in different eroded microhabitats followed the order of shallow gully>rill>bare slope>deposit body, while capillary pore size followed the order of deposit body>bare slope>shallow gully>rill. There were no significant differences in

收稿日期: 2022-11-05

修回日期: 2022-12-06

资助项目: 辽宁省自然资源科技创新项目“辽西矿区土壤基质改良与生物修复技术及应用研究”; 辽宁工程技术大学学科创新团队项目(LNTU20TD-01, LNTU20TD-25)

第一作者: 王东丽(1986—), 女(汉族), 山西省怀仁市人, 博士, 副教授, 主要从事植被恢复与生态修复研究。Email: starhome0522@163.com。

通讯作者: 赵晓亮(1981—), 男(汉族), 安徽省淮北市人, 博士, 副教授, 主要从事矿区环境治理与修复研究。Email: zhaoxiaoliang2008@126.com。

the pH value of different eroded microhabitats, but there were differences in the changes in different soil layers. Electrical conductivity followed the order of deposit body>bare slope>shallow gully>rill, and was higher in the 10—20 cm soil layer than in the 0—10 cm soil layer. The matrix moisture content and capillary water capacity of different eroded microhabitats followed the order of deposit body>bare slope>shallow gully>rill. The matrix moisture content and capillary water capacity of the bare slope and the shallow gully were the lowest on the upper slope, while they were lowest for the rill on the middle slope. [Conclusion] The substrate moisture characteristics of weathered gangue dumps were significantly affected by bulk density and capillary porosity. There were relatively more sand and medium-coarse grain particles in bare slopes and deposit bodies of weathered gangue dumps, and the moisture characteristics were superior. Bare slopes and deposit bodies can provide a safe habitat for vegetation settlement and restoration.

Keywords: weathered gangue dumps; eroded microhabitats; mechanical composition; physical-chemical properties; moisture characteristics

生境作为生物生活的空间和全部生态因子的总和,其类型直接影响植物群落结构、物种组成和多样性^[1]。微生境是指空间尺度一般在0—1 m范围内的生境^[2]。由于小尺度的环境异质性,一些微生境非常有利于种子萌发与幼苗存活,这些适宜的微生境最早被称为安全生境(safe sites)^[3],指的是可以满足种子萌发与幼苗建植的基本要求的生境,在立地条件恶劣的生态系统或裸地原生演替过程中对植物的定居具有重要意义^[4-5]。煤矸石山是煤炭开采过程中大量固体废弃物排放堆积形成的,不仅占用大量的土地资源,污染地下水、空气和土壤,水土流失和地质灾害频繁,严重危害矿区的生态环境^[6],生态恢复是解决其环境保护和综合治理的有效途径。中国矿区生态恢复30 a来,已开展了一系列矿区土地复垦与生态修复理论和技术方面的研究与实践,涉及不同区域矸石山的整地方式^[7-8]、基质改良^[9-10]、植被恢复动态、效益、机制、模式与技术^[11-12]等方面。辽西大部分矿区早期由于缺乏科学的复垦规划,后期资金难以保障,多数矸石山只能依靠自然恢复。它们经过长期风化作用形成粒径不一的基质。土壤侵蚀作为坡面上的一种自然过程,通常伴随着土壤养分的流失、土壤持水力的降低及冲淤微地形的形成等,影响着植物的生长、发展以及繁殖、更新^[13-15]。由于矸石山坡普遍较陡,风化物较松散,在水力作用下,坡面形成大量的侵蚀微地貌。辽西地处水土资源匮乏的生态脆弱区,矿区废弃地坡面植被定居困难,恢复缓慢,水力侵蚀形成的微生境能否为其自然植被定居提供有利的安全生境及其影响机制有待明确。本研究以辽西风化矸石山坡面不同侵蚀微生境为研究对象,通过野外调查与室内测定,研究不同侵蚀微生境下基质的理化性质与水分特征及其相互关系,旨在掌握其变化规律与作用关系,进而为揭示其植被定居与恢复的驱动与限制机制提供理论基础,为北方矿区废弃地植被重建的实践提供参考依据。

1 研究区概况

本研究区位于辽宁省阜新市,地处辽宁省西北部。该区北临科尔沁沙地,东接辽河平原,西靠热河山地,为辽河与大凌河流域上中游浅山丘陵区。全区呈现长矩形,总面积约为 $1.05 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。地势西北高,东南低;西南高,东北低。该区属北温带半干旱半湿润大陆性季风气候区,四季分明。日照丰富,干燥多风。降水时空分布不均,冬季严寒少雪,夏季炎热多雨。经常有干旱、冰雹、大风、暴雨、霜冻等不利天气,自然灾害频繁。该地的代表性植物有:油松(*Pinus tabulaeformis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、家榆(*Ulmus pumila*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、荆条(*Vitex negundo*)等^[16]。地带性土壤是在各种岩石风化物残积母质上以黄土、红土母质发育的淋溶褐土、褐土性土,大多分布于丘陵和低山丘陵区,土层较薄。阜新市拥有百余年的煤炭开采历史,境内广泛分布大量早期开采遗留的矿山废弃地,主要有海州露天排土场、新邱排土场、高德矸石山和孙家湾矸石山等。

2 研究方法

2.1 样地选择

通过对阜新市周边煤矸山进行充分探查,于2019年7月选取位于城区南部($42^{\circ}0'15.41''$ — $42^{\circ}0'11.11''\text{N}$, $121^{\circ}43'5.29''$ — $121^{\circ}43'10.86''\text{E}$)的某风化矸石山作为研究区。该地区海拔约180 m,平台面积为 1.25 km^2 ,坡长变化在15~17 m,坡度为 38.5° ~ 39.1° 。调查矿区排矸年限约为8~10 a,经过多年的风化作用,该矸石山表面已遭受不同程度的侵蚀,形成不同类型的侵蚀微地貌。研究区的侵蚀微生境主要类型为细沟、浅沟和堆积体。选取以广泛分布细

沟和浅沟为主的典型阳坡作为样地,不同侵蚀微生境的具体形态详见文献[17]。

2.2 侵蚀微生境的选取

在所选样地,按上、中、下坡位分别选取代表性裸坡、细沟和浅沟及坡下堆积体作为研究对象。样方大小分别为:裸坡 0.5 m×0.5 m,细沟 1 m×0.25 m,浅沟 1 m×0.5 m,堆积体 1 m×1 m。各选取三组重复,其具体特征详见表 1。

2.3 样品的采集与测定

2.3.1 样品采集 在上述所选微生境,随机选取 6 个样点,采用土钻在 0—20 cm 的基质剖面内每隔 10 cm 取样,用于基质机械组成与化学性质的测定。同时,再随机选取 3 个样点,采用容积为 200 cm³ 的大环刀于 0—20 cm 的基质剖面内进行样品采集,用于测定基质容重、毛管孔隙度、基质含水率及毛管持水量等指标。

2.3.2 基质理化特征的测定 由于基质组成的特殊性,本研究采用的粒径划分标准与以往土壤颗粒组成划分标准不同。主要根据吕刚等^[18]研究,结合风化矸石山的实际情况,将基质的机械组成按粒径

<2 mm, 2~10 mm, 10~20 mm 和 >20 mm 划分为砂粒、中粗粒、粗粒和巨粒 4 个组分。将采集的样品充分晾干后,通过四分法将样品分为 4 等份,通过对分法取处于对角线位置的两份,根据阿基米德原理采用排水法测量样品中各粒组的含量。含水率采用烘干法测定,基质的酸碱度和电导率分别采用 PHS-3C 酸度计和 DDSJ-318 电导率仪测定。基质的容重和毛管持水量采用室内环刀原状土吸水法测定^[19-20],毛管孔隙度基于容重和毛管持水量换算而得,具体计算公式为:

$$\text{毛管持水量} = \frac{\text{环刀内水分重量}}{\text{环刀内干土质量}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{毛管孔隙度} = \text{毛管持水量} \times \text{容重} \times 100\% \quad (2)$$

2.4 数据处理与统计分析

研究中所涉及的数据采用 Excel 软件进行整理,利用 SPSS 25.0 对不同基质的理化性质及水分特征进行单因素方差分析(ANOVA)与多重比较(LSD)。采用 Pearson 相关性分析法对水分特征与理化性质进行相关性分析,其结果图的绘制使用 Origin 2018 软件进行。

表 1 不同侵蚀微生境的基本信息

Table 1 Basic information of different erosion microhabitats

侵蚀微生境	形态参数	单沟平均侵蚀量	植物群落特征
裸坡	—	—	植物易于集中生长在坡面偶有的片状小坑,密度为 0~20.0 株/m ²
细沟	宽 19.59±1.05 cm 深 10.48±0.71 cm	0.27±0.01 m ³	植物多生长沟与坡面交界处,种类较少,密度为 13.3~45.3 株/m ²
浅沟	宽 39.63±1.08 cm 深 21.19±1.35 cm	0.42±0.06 m ³	植物罕见生长,密度为 1.3~4.0 株/m ²
堆积体	—	—	植物生长较好,种类较丰富,密度为 5.0~52.0 株/m ²

注:数据为平均值±标准误。

3 结果与分析

3.1 不同侵蚀微生境基质的物理特征

3.1.1 基质的机械组成特征 由图 1 可以看出,不同垂直剖面土层各侵蚀微生境的基质机械组成均以 <2 mm 的砂粒为主,为 32.86%~65.22%,平均值为 48.35%;2~10 mm 的中粗粒含量次之,10~20 mm 的粗粒和 >20 mm 的巨粒含量较低,平均值分别为 13.2% 和 11.93%。然而,各粒径基质在不同侵蚀微生境间变化各异,而且不同土层间存在差异。在 0—10 cm 土层中,砂粒和中粗粒含量均表现为:堆积体>裸坡>细沟>浅沟,而巨粒和粗粒则表现为相反的规律;且浅沟中的砂粒含量显著低于其他侵蚀微生境,巨粒含量明显高于其他侵蚀微生境。而在

10—20 cm 土层中,除浅沟的中粗粒含量显著低于细沟,具有差异性($p \leq 0.05$)外,其他粒径含量在不同侵蚀微生境间均无显著差异。

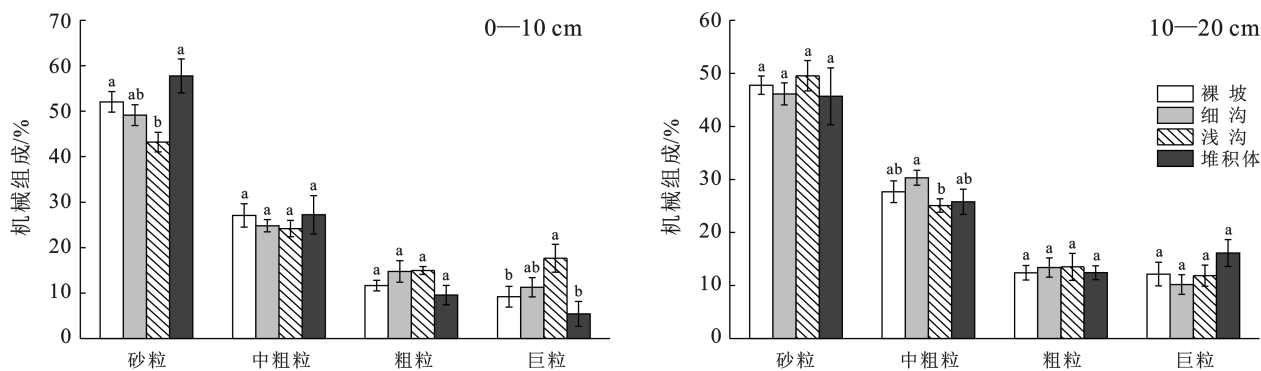
3.1.2 容重与孔隙度 不同侵蚀微生境基质容重与孔隙度的规律各异(图 2)。不同侵蚀微生境基质容重的平均值由大到小依次为:浅沟>细沟>裸坡>堆积体,但不同侵蚀微生境间无显著性差异($p > 0.05$),而毛管孔隙度的平均值由大到小依次表现为堆积体>裸坡>浅沟>细沟,其中堆积体显著高于细沟和浅沟($p \leq 0.05$)。

3.2 不同侵蚀微生境基质的化学特征

3.2.1 基质的酸碱度特征 不同侵蚀微生境下基质酸碱度与电导率及在垂直剖面的分布各异(图 3)。不同侵蚀微生境基质的酸碱度均分布在 6.5~7.0 之间,

呈弱酸性。在不同土层均表现为:裸坡>堆积体>浅沟,且在 0—10 cm 均稍低于在 10—20 cm,但均不存在

显著差异($p>0.05$);而细沟在不同土层表现迥异,在 0—10 cm 高于其他微生境,在 10—20 cm 则反之。



注:不同字母表示同一粒径不同侵蚀微生境间差异显著($p\leq 0.05$)。下同。

图 1 不同侵蚀微生境基质的机械组成特征

Fig.1 Mechanical composition characteristics of substrates in different eroded microhabitats

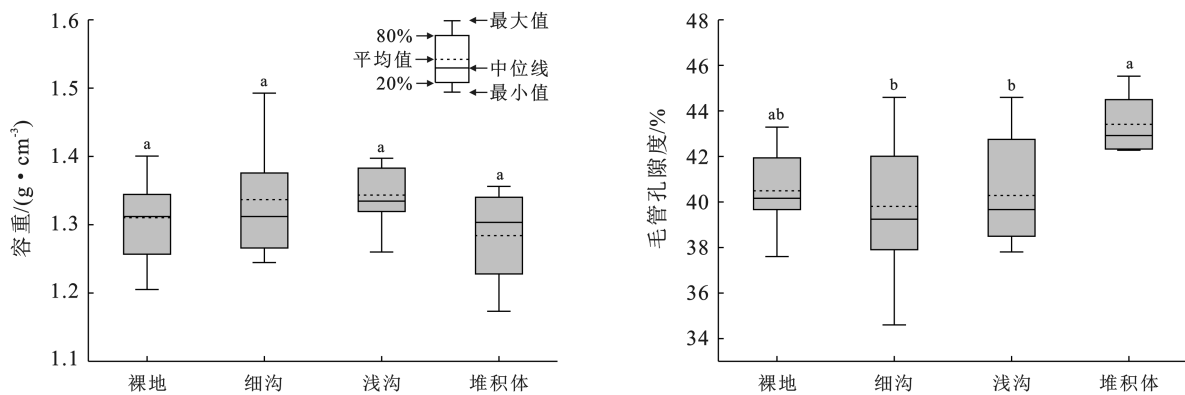


图 2 不同侵蚀微生境基质容重及毛管孔隙度

Fig.2 Bulk density and capillary porosity of substrates in different eroded microhabitats

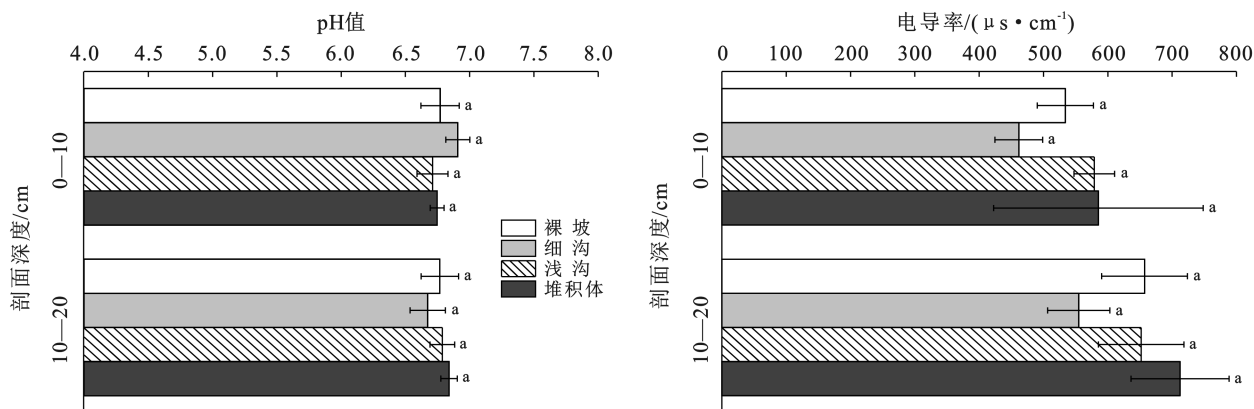


图 3 不同垂直剖面深度下不同侵蚀微生境基质化学特征

Fig.3 Chemical characteristics of matrix in different erosion microhabitats at different vertical profile depths

3.2.2 基质的电导率特征 不同侵蚀微生境间的基质电导率变化在 461.75~712.33 $\mu S/cm$,无论在任土层均表现为:堆积体>浅沟>裸坡>细沟,而且电导率均表现为 10—20 cm 土层高于 0—10 cm 土层。这可能是表层基质中盐离子被水流冲刷带走或淋溶

至下层所导致的(图 3)。

3.3 侵蚀微生境基质的水分特征

不同侵蚀微生境下基质的含水率与毛管持水量的变化规律具有一致性(图 4),其大小均表现为:堆积体>裸坡>浅沟>细沟,其中不同侵蚀微生境间的

含水率不存在显著差异 ($p > 0.05$), 而堆积体的毛管持水量显著高于细沟与浅沟 ($p \leq 0.05$)。

不同侵蚀微生境水分特征的基本情况。由表 2 可以看出, 不同侵蚀微生境下基质含水率与毛管持水量随坡位变化表现各异。对于裸坡, 其含水率在坡面由上至下呈先升高后降低的趋势, 且在不同坡位间存在显著差异 ($p \leq 0.05$), 而细沟的含水率相反, 浅沟则表现为在坡面由上至下呈逐渐升高的趋势, 但均不存在显著性差异 ($p > 0.05$); 不同侵蚀微生境下基质毛管持水量在坡面上的变化规律与含水率具有一致性, 但均无显著性差异 ($p > 0.05$)。

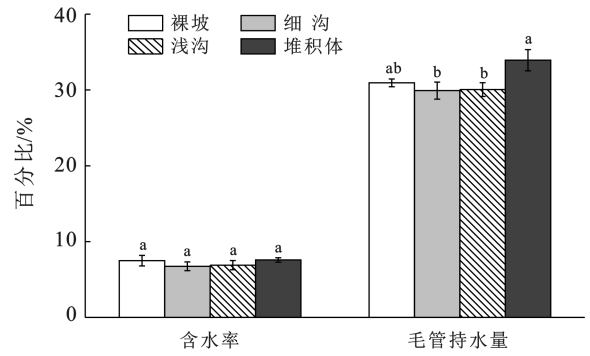


图 4 不同侵蚀微生境基质的水分特征

Fig.4 Water characteristics of substrates in different eroded microhabitats

表 2 不同侵蚀微生境水分特征的基本情况

Table 2 Basic information on water characteristics of different erosion microhabitats

侵蚀生境类型	含水率/%			毛管持水量/%		
	坡上	坡中	坡下	坡上	坡中	坡下
裸坡	5.39±0.18 ^c	9.79±0.82 ^a	7.29±0.40 ^b	30.54±1.30 ^a	31.66±0.77 ^a	30.62±0.71 ^a
细沟	7.28±1.08 ^a	5.15±0.60 ^a	7.80±0.68 ^a	30.91±1.04 ^a	26.91±1.10 ^a	31.92±2.35 ^a
浅沟	5.42±0.18 ^a	7.02±1.14 ^a	8.24±1.04 ^a	27.79±0.36 ^a	30.94±1.34 ^a	31.44±2.01 ^a

注: 括号中数据为平均值±标准误, 同行不同字母表示差异显著 ($p \leq 0.05$)。

3.4 土壤基质水分与理化性质的关系

不同侵蚀微生境基质的水分特征与理化性质的相关性分析如表 3 所示, 其含水率与机械组成均无显著的相关性。裸坡的基质含水率与其毛管孔隙度呈显著正相关关系 ($p \leq 0.05$); 细沟的基质毛管持水量与其毛管孔隙度呈极显著正相关关系 ($p \leq 0.01$); 浅

沟的基质含水率和毛管持水量均与其容重显著负相关 ($p \leq 0.05$), 而与其毛管孔隙度呈极显著正相关关系 ($p \leq 0.01$); 堆积体的毛管持水量与其电导率显著负相关 ($p \leq 0.05$)。

可见, 基质的水分特征与大部分侵蚀微生境的容重及毛管孔隙度密切相关。

表 3 基质水分与基质理化性质的相关性

Table 3 Correlation between matrix moisture and matrix physicochemical properties

基质水分特征	侵蚀微生境	物理性质						化学性质	
		砂粒	中粗粒	粗粒	巨粒	容重	毛管孔隙度	pH 值	电导率
含水率	裸坡	-0.363	-0.060	0.065	0.319	0.053	0.753	0.049	-0.444
	细沟	0.173	0.270	0.146	-0.560	-0.588	0.621	0.188	0.579
	浅沟	-0.208	-0.103	-0.329	0.476	-0.750*	0.915**	0.059	-0.323
	堆积体	0.534	-0.917	-0.927	0.599	-0.702	0.512	-0.334	-0.953*
毛管持水量	裸坡	0.125	0.153	-0.167	-0.175	-0.532	0.462	-0.051	0.198
	细沟	0.368	0.500	-0.121	-0.666	-0.481	0.838**	0.018	0.602
	浅沟	-0.253	-0.219	-0.272	0.553	-0.890**	0.971**	-0.186	-0.074
	堆积体	0.730	-0.499	-0.725	-0.011	-0.930	0.675	-0.079	-0.757

注: *, ** 分别表示在 $p=0.05$ 和 $p=0.01$ 水平上的显著性。

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 不同侵蚀微生境下基质理化性质的差异 微地形改变对土壤属性和微生境、降雨入渗及水蚀过程等方面会产生重要的影响^[1]。土壤机械组成是土壤结构的基础^[21], 对土壤的肥力、水分、热量及土壤结构

等都有一定的影响^[22], 是土壤重要的物理性质。本研究发现, 风化 10 a 左右的矸石山主要以砂粒为主, 在不同侵蚀微生境下变化为 32.86%~65.22%, 而 Li 等^[23] 对山西阳泉煤矸石废弃地 3 种植被类型下矸石风化物的研究表明, 煤矸石风化物粒径小于 3 mm 所占比重变化在 40.8%~66.7%, 而且王丽艳等^[24] 研究表明植被的恢复可增加小粒径的比重, 可见研究区基

质在无植被恢复的情况下已可风化趋于细粒化,但不同侵蚀微生境间变异性相对较大,存在一定的差异。由于研究区风化矽石山基质粒径大小不一,分布不均,在水力冲刷作用下,不同粒径的基质发生重新分布。本研究区中,0—10 cm 深度受水力冲刷作用强烈,侵蚀沟中的砂粒基质受到水力作用由上冲刷下来,在堆积体表层积聚,特别是浅沟基质中的砂粒含量显著低于堆积体和裸坡;相反,巨粒由于重量大可抵抗强烈的水流冲刷作用,可在水力作用强烈的浅沟中保留,故其含量显著高于堆积体和裸坡。而不同侵蚀微生境在水流冲刷作用难以触及的 10—20 cm 土层中,其砂粒、粗粒和巨粒均没有显著差异性,可见不同侵蚀微地形通过改变水蚀过程进一步对其基质的机械组成进行再重塑。

土壤容重与土壤孔隙度直接对土壤水源涵养功能起重要作用,影响其持水性和透水性,是土壤中基础物理性质的指标^[25]。在本研究中,不同侵蚀微生境基质容重无显著性差异,整体分布区间为 1.2~1.4 g/cm³,姚贤良^[26]研究认为一般植物适应于生长在容重小于 1.3 g/cm³ 的土壤中,而容重达到 1.4 g/cm³ 时,容重成为制约植物根系生长的限制性因素。可见本研究区风化矽石山容重整体满足植物根系生长的要求,其中浅沟容重的平均值最大,且变异性较小,可能与其基质以大粒径为主有关;而堆积体反之。不同侵蚀微生境的毛管孔隙度则表现为堆积体显著大于细沟和浅沟,由于毛管孔隙具有毛细管作用,水分可借毛管弯月面力储存其内,并依靠毛管引力运移,是对植物最有利的水分状态,应该是导致堆积体植物生长最佳的原因之一。

土壤酸碱度和电导率是基质的基本化学性质之一,能够影响矿物的形成与分解释放和富集等各种物理化学反应^[27],是描述土壤盐分状况,影响土壤肥力,植物生长和微生物活动的重要因素之一^[28]。研究表明,电导率均表现为堆积体最大,细沟最小,可见对于植物生长而言,细沟对植物生长的化学限制较小;且不同侵蚀微生境的电导率在 10—20 cm 土层均高于 0—10 cm 土层,表明本研究区 0—10 cm 土层的基质盐分状况较好。因为电导率表征的是基质中水溶性盐的状况,由于风化矽石山具有丰富的孔隙,淋溶作用强烈,使得表层的水溶性盐离子淋溶至下层,导致表层的电导率较低;同理,基质孔隙度也表现为堆积体最大,细沟最小,再次验证风化矽石山基质孔隙对其电导率的影响较大。研究区不同侵蚀微生境基质的酸碱度整体呈中性,且无显著差异性,不是该区不同侵蚀微生境植被定居与恢复的限制因素;不同侵

蚀微生境的酸碱度在垂直剖面具有差异性,细沟的 pH 值在不同土层变化较大,表层最大,下层最小,可能与其独特的微地貌有关,可以汇集一定的径流。由于具有中等的孔隙度,基质中盐基离子易淋溶至下层。相对来说浅沟由于水力冲刷作用强,径流来不及停滞与入渗,故没有明显的垂直剖面差异。此外,史沛丽^[29]对西部风沙区采煤塌陷土研究发现其电导率和酸碱度具有相似的变化趋势,本研究结果整体也表现出一致规律,除表层的细沟与裸坡和下层外。

4.1.2 不同侵蚀微生境下基质水分特征的差异及影响机制 水分是植物生长与发展最敏感的限制因子,特别是在脆弱生态区植被恢复与生态重建过程中起决定性作用^[30-31]。本研究发现,同一侵蚀微生境基质的含水率与毛管持水量具有一致的变化趋势,这与郑彬^[32]对阜新矿区煤矽石山风化进程中风化物理化学性质的变化研究的结果相同。但不同侵蚀微生境基质水分特征的变化趋势不尽相同。含水率与毛管持水量在不同侵蚀微生境中均表现为裸坡和堆积体高于细沟和浅沟。其中堆积体的含水率与毛管持水量最大,与胡振琪等^[33]对风化矽石山土壤水文效应的研究结果一致。与其他侵蚀微生境相比,浅沟含水率最低,与张宏芝等^[34]对陕北微地形土壤的研究所得到的结论有所不同,陕北黄土坡面的土壤含水率与毛管持水量表现为浅沟高于原状坡,这是两个区域浅沟的机械组成差异大所致,体现了矽石山不同侵蚀微生境的独特性。

水分对山地坡面植被格局影响的重要性,一直备受关注。本研究表明,在坡中基质含水率与毛管持水量在不同侵蚀微生境下变化一致,且裸坡最佳,细沟最差,而在坡上与坡下则各异,大部分情况下表现为细沟水分状况优于其他微生境,可能与坡中为凸型坡有关,所以坡型对于微生境水分特征的影响有待明确。在垂直剖面变化各异,浅沟 10—20 cm 没有暴露在地表,无法分化成细小颗粒,受水力冲刷作用不明显,无明显规律。水热条件的差异是造成微地形上景观差异的主要原因,可能影响其植被的定居与发展及格局,有待更深入的研究。

水分特征通常与其物理结构特征密切相关。Gao Xiaodong 等^[35]研究发现在坡面沟道内土壤质地对土壤水分的影响要大于地形因素。本研究发现,阜新风化矽石山不同侵蚀微生境下基质的水分特征与其机械组成没有显著关系,但大部分侵蚀沟微生境基质的水分特征与其容重及毛管孔隙度的含量显著相关,其中细沟的基质毛管持水量与其毛管孔隙度呈现极显著正相关,浅沟的基质含水率和毛管持水量与其毛管

孔隙度极呈显著正相关,而 Zhu Yuanjun 和 Shao Mingan^[36]认为坡面表层 15 cm 土壤含水率受坡度、容重和砾石覆盖度影响较小,这可能与其研究对象各异有关,再次体现风化矸石山的特殊性。基质这些独特的物理特性与水分特性及关系,直接或间接地影响着研究区植被定居与分布格局,有待深入研究。

4.2 结论

辽西风化矸石山不同侵蚀微生境基质以砂粒为主,在 0—10 cm 中,堆积体砂粒和中粗粒含量最大,裸坡次之,细沟与浅沟最小;巨粒和粗粒含量在不同侵蚀微生境下表现出相反的规律。在 10—20 cm 中,浅沟的中粗粒含量显著低于细沟,具有差异性,其他粒径含量在不同侵蚀微生境间均无显著差异。基质容重在侵蚀微生境下表现为:浅沟>细沟>裸坡>堆积体,而毛管孔隙度大小表现为:堆积体>裸坡>浅沟>细沟。基质的酸碱度在不同土层均表现为:裸坡>堆积体>浅沟,且在 0—10 cm 均稍低于 10—20 cm;而细沟在不同土层表现迥异,在 0—10 cm 高于其他微生境,在 10—20 cm 则反之。基质电导率均表现为:堆积体>浅沟>裸坡>细沟,而且在 10—20 cm 均高于 0—10 cm 的基质。基质含水率与毛管持水量均表现出与毛管孔隙度一致的规律,表现为:堆积体>裸坡>浅沟>细沟。风化矸石山浅沟和细沟的巨粒和粗粒相对较多,水分较差,而裸坡和堆积体反之,可为植被定居与恢复提供安全生境。大部分侵蚀沟微生境基质的水分特征与其容重及毛管孔隙度的含量显著相关。

[参 考 文 献]

- [1] 张大才,李双智,张锐.高寒草甸湿润与干旱化生境中植物多样性的海拔分布格局[J].草业科学,2018,35(5):1013-1021.
- [2] 卫伟,余韵,贾福岩,等.微地形改造的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2013,33(20):6462-6469.
- [3] Harper J L. Population Biology of Plants [M]. London: Academic Press, 1977.
- [4] Jumpponen A, Henry V, Mattson K G, et al. Characterization of "safe sites" for pioneers in primary succession on recently deglaciated terrain [J]. Journal of Ecology, 1999,87(1):98-105.
- [5] Jones C C, Moral R D. Dispersal and establishment both limit colonization during primary succession on a glacier foreland [J]. Plant Ecology, 2009,204(2):217-230.
- [6] 于桂芬,吴祥云,杨亚平,等.潞安矿区煤矸石山水土流失特征及植被恢复关键技术[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(2):244-246.
- [7] 王晓春,蔡体久,谷金锋.鸡西煤矿矸石山植被自然恢复规律及其环境解释[J].生态学报,2007,27(9):3744-3751.
- [8] 张鸿龄,孙丽娜,孙铁珩,等.矿山废弃地生态修复过程中基质改良与植被重建研究进展[J].生态学杂志,2012,31(2):460-467.
- [9] 王尚义,石瑛,牛俊杰,等.煤矸石山不同植被恢复模式对土壤养分的影响:以山西省河东矿区 1 号煤矸石山为例[J].地理学报,2013,68(3):372-379.
- [10] 杨鑫光,李希来,金立群,等.不同人工恢复措施下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究[J].草业学报,2019,164(3):3-13.
- [11] 胡振琪,肖武.关于煤炭工业绿色发展战略的若干思考:基于生态修复视角[J].煤炭科学技术,2020,48(4):35-42.
- [12] 党倩楠,王进鑫,姚丽霞,等.干旱荒漠区煤矸石山覆土区土壤水分物理性质的空间异质性[J].应用生态学报,2021,32(1):281-288.
- [13] Poesen J. Transport of rock fragments by rill flow: a field study [J]. Catena Supplement, 1987(8):35-54.
- [14] Jiao Juying, Han Luyan, Jia Yanfeng, et al. Can seed removal through soil erosion explain the scarcity of vegetation in the Chinese Loess Plateau? [J] Geomorphology, 2011,132(1):35-40.
- [15] 王东丽,焦菊英,王宁,等.黄土丘陵沟壑区不同侵蚀微环境对植物更新的影响[J].干旱区研究,2017,34(5):1141-1148.
- [16] 陈建平.阜新矿区矸石山植被技术影响因素[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(S2):157-159.
- [17] 王东丽,李佳,张子倩,等.风化矸石山不同侵蚀微生境的水热特征[J].生态学杂志,2021,40(8):2583-2592.
- [18] 吕刚,王磊,卢喜平,等.不同复垦方式排土场砾石对饱和导水率和贮水能力的影响[J].土壤学报,2017,54(6):1414-1426.
- [19] 曹鹤,薛立,谢腾芳,等.华南地区 8 种人工林的土壤物理性质[J].生态学杂志,2009,28(4):620-625.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [21] 张素,熊东红,校亮,等.冲沟不同部位土壤机械组成及抗冲性差异[J].土壤,2016,48(6):1270-1276.
- [22] 邓廷飞,刘彦,颜秋晓,等.贵州典型山银花土壤机械组成与养分特性及其关系[J].水土保持学报,2014,28(5):209-214.
- [23] Li Suqing, Wu Dongmei, Zhang Jintun. Effects of vegetation and fertilization on weathered particles of coal gob in Shanxi mining areas, China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005,124(1/3):209-216.
- [24] 王丽艳,韩有志,张成梁,等.不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征[J].生态学报,2011,31(21):6429-6441.

- [10] 程建军, 智凌岩, 薛春晓, 等. 铁路沿线下导风板对风沙流场的控制规律[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 16-23.
- [11] Zhang Shuai, Ding Guodong, Yu Minghan, et al. Application of boundary layer displacement thickness in wind erosion protection evaluation: case study of a salix psammophila sand barrier [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(4): 592-608.
- [12] Wang Tao, Qu Jianjun, Ling Yuquan, et al. Shelter effect efficacy of sand fences: a comparison of systems in a wind tunnel [J]. Aeolian Research, 2018, 30: 32-40.
- [13] 田美荣, 傅馨逸, 杨伟超, 等. 挡风墙设计及其在呼伦贝尔沙地治理中的应用[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(5): 970-975.
- [14] 康向光, 李生字, 王海峰, 等. 高立式沙障不同叠加模式的阻沙量对比分析[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 550-555.
- [15] 王海龙, 刘畅, 孙婧, 等. 沙漠铁路固沙砖设计参数的数值模拟[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 59-64.
- [16] 丛顺, 李正农, 宫博, 等. 风沙流场特性及对建筑物影响的风洞试验研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(6): 1989-2001.
- [17] 鲁涛, 刘维, 徐玉波, 等. 台特玛湖干涸湖盆区风蚀起沙研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(11): 119-126.
- [18] Yang Wei, Yu Meng, Yan Bowen, et al. Wind tunnel tests of wake characteristics for a scaled wind turbine model based on dynamic similarity [J]. Energies, 2022, 15(17): 61-78.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ/T338-2014 建筑工程风洞试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [20] 刘畅. 防风沙设施力学行为的研究及工程应用[D]. 河北张家口: 河北建筑工程学院, 2019.
- [21] 陈波, 骆盼育, 杨庆山. 测压管道系统频响函数及对风效应的影响[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 130-134.
- [22] Huang Bing, Li Zhengnong, Zhao Zhefei, et al. Near-ground impurity-free wind and wind-driven sand of photovoltaic power stations in a desert area [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 179: 483-502.
- [23] 孙涛, 王祺, 刘世增, 等. 单排光伏板防风固沙功能的风洞模拟研究[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4): 111-119.
- [24] Tominaga Y, Okaze T, Mochida A. Wind tunnel experiment and CFD analysis of sand erosion/deposition due to wind around an obstacle [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 182: 262-271.
- [25] 郝负洪, 刘艳晨, 郭健, 等. 风沙环境变量相似理论及其应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(3): 640-649.
- [26] 杨具瑞, 方铎, 毕慈芬, 等. 非均匀风沙起动规律研究[J]. 中国沙漠, 2004, 24(2): 136-139.
- [27] 辛林桂, 程建军, 张志平, 等. 铁路侧向导沙沙障流场演化规律研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 621-628.

(上接第 30 页)

- [25] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5183-5190.
- [26] 姚贤良. 土壤物理学的研究动态及展望[J]. 土壤, 1985, 17(6): 281-289.
- [27] 刘锋. 阜新矿区排土场土壤质量对坡向与坡位的响应[D]. 辽宁 阜新: 辽宁工程技术大学, 2013.
- [28] 张剑, 宿力, 王利平, 等. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响: 以敦煌阳关湿地为例[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 580-589.
- [29] 史沛雨. 采煤沉陷对西部风沙区土壤理化特性和细菌群落的影响[D]. 北京: 中国矿业大学, 2018.
- [30] 裴宗阳, 胡振华, 刘瑞龙, 等. 我国煤矸石山水分研究进展[J]. 山西水土保持科技, 2011, 6(2): 4-6.
- [31] 冀雯霞, 赵峰侠, 张瑞, 等. 晋西北黄土丘陵区土壤和地形因子对草地植被优势种功能性状的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(3): 749-758.
- [32] 郑彬. 煤矸石自然风化进程中风化物理性质变化研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [33] 胡振琪, 张光灿, 毕银丽, 等. 煤矸石山刺槐林分生产力及生态效应的研究[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 621-628.
- [34] 张宏芝, 朱清科, 王晶, 等. 陕北黄土坡面微地形土壤物理性质研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6): 55-58.
- [35] Gao Xiaodong, Wu Pute, Zhao Xining, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2011, 87(3): 357-367.
- [36] Zhu Yuanjun, Shao Mingan. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale dump slope in Liudaogou catchment on the Northern Loess Plateau of China [J]. Geoderma, 2008, 147(3/4): 185-191.